第45卷 第6期
2022年11月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 45 No. 6
Nov. 2022

黄土丘陵区典型退耕恢复植被土壤生态化学计量特征

郭 鑫, 魏天兴, 陈宇轩, 沙国良, 任 康, 于 欢

(北京林业大学水土保持学院/水土保持国家林业局重点实验室/山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,北京 100083)

摘 要: 为探究不同植被土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)化学计量特征及其影响因素,以黄土丘陵区油松、刺槐、沙棘和草地4种典型退耕恢复植被0~100 cm土壤为研究对象,分析不同植被土壤有机碳(SOC)、全氮(STN)、全磷(STP)含量及其化学计量特征。结果表明:(1) 不同恢复植被对土壤养分含量有显著影响,刺槐的SOC、STN最高,油松的SOC、STN最低,STP表现为草地>刺槐>油松>沙棘。(2) 不同恢复植被土壤养分具有"表聚性",随土层深度增加,SOC和STN含量呈下降趋势,而STP的变异性较弱。特别是刺槐的SOC和STN在60~100 cm呈增加趋势。(3) 不同恢复植被土壤SOC:STN(C:N)、SOC:STP(C:P)差异不显著(P>0.05),刺槐的土壤STN:STP(N:P)显著高于其他植被类型(P<0.05),土壤C:N、C:P、N:P均低于全球及全国平均水平,研究区有机质的分解速率较快,P的有效性高,植被生长主要受N元素限制。(4) 研究区土壤C:N、C:P和N:P主要受SOC和STN影响;土壤养分与土壤含水量(SWC)和土壤容重(BD)呈负相关,与土壤粉粒(slit)和黏粒(clay)含量呈正相关,STP对土壤细颗粒的响应强度大于SOC和STN。研究区土壤化学计量在不同退耕恢复植被间差异显著,其中刺槐的土壤养分含量较其他植被类型更好,可为该地区植被恢复工作进一步开展提供参考。

关 键 词: 黄土丘陵区; 退耕恢复植被; 土壤养分; 生态化学计量; 土壤理化性质

文章编号: 1000-6060(2022)06-1899-09(1899~1907)

土壤碳(C)、氮(N)和磷(P)作为植物生长发育必不可少的营养元素,其生态化学计量特征直接或间接影响土壤有机质的矿化过程,是反映土壤质量及肥力的重要指标[1]。其中,土壤有机碳(SOC)、全氮(STN)和全磷(STP)通常用来代表土壤的总体养分水平[2],土壤SOC:ST(C:N)、SOC:STP(C:P)可反映有机物质量和分解速率[3],土壤STN:STP(N:P)可反映植物生长过程中的受限制情况[4]。因此,探究土壤C、N、P的生态化学计量特征,对理解生态系统生物地球化学循环、完善生态系统的生态效益等具有重要意义。

目前,关于黄土高原土壤生态化学计量的研究主要集中在林龄、演替阶段、植被组分、海拔及林分密度等[5-9]方面,对不同植被类型土壤化学计量特征研究较少,且现有研究多集中在表层,对更深层土壤的变化特征研究较为缺乏[10]。已有的研究表明,不同植被类型对土壤的理化性质有重要影响,且不同植被类型下土壤侵蚀程度不同,对养分的吸收与归还程度也不相同[11];同时也有研究表明,超过一半的土壤C储存在20 cm深度以下[12],深层土壤远离自然和人为因素的影响,具有更高的固C能力[13],而土壤中C的循环密切影响着土壤中的N、P水平;此外,不同植被根系在土层中的分布不同也会影响土壤C、N、P的垂直分布[14]。因此,研究黄土丘陵区不同植物群落间更深层的土壤C、N、P之间的循环和耦合关系,对反映该地区植被恢复对土壤养分状况的改善情况有重要指导意义。

鉴于此,本研究以水蚀风蚀交错区陕北黄土丘陵退耕还林区油松、刺槐、沙棘和草地4种典型退耕恢复植被0~100 cm土壤为研究对象,探讨SOC、

收稿日期: 2022-01-17; **修订日期**: 2022-04-15

基金项目: "十三五"国家重点研发计划项目课题(2016YFC0501705);国家生态系统观测研究网络运行服务项目(2019-2020)资助

作者简介: 郭鑫(1998-),女,硕士研究生,主要从事水土保持等方面的研究. E-mail: guoxin0408@bjfu.edu.cn

通讯作者: 魏天兴(1969-),男,博士,教授,主要从事流域自然地理过程、生态修复等方面的研究. E-mail: weitx@bjfu.edu.cn

STN、STP生态化学计量的分布特征，旨在评价黄土高原植被恢复对土壤的影响，为黄土高原植被恢复工作做一些理论探讨。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省吴起县（107°39′~108°33′E，36°33.5′~37°24.5′N），海拔高度1233~1809 m，年平均气温7.8 ℃，属于温带大陆性季风气候，是典型的黄土丘陵沟壑区。吴起县降雨主要集中在7—9月，且多为暴雨，年均降水量约为483.4 mm[15]。土壤肥力、保水性较差，水土流失严重。自退耕还林还草工程实施以来，研究区主要在坡耕地及荒山开展植被恢复工作并取得了很大成效，目前形成了以人工营造的山杏（*Armeniaca sibirica*）、刺槐（*Robinia pseudoacacia*）、榆树（*Ulmus pumila*）、油松（*Pinus tabulaeformis*）、侧柏（*Platycladus orientalis*）等乔木，沙棘（*Hippophae rhamnoides*）、柠条锦鸡儿（*Caragana korshinskii*）等灌木，以及自然恢复草地为主的乔灌草植物群落。

1.2 土壤样品采集与养分测定

样品采集于2020年9月进行，本次研究通过实地调查与查阅当地退耕资料，选取研究区内相同退耕年限具有典型代表性的20 m×20 m的油松、刺槐、沙棘和草地样地，样地基本信息见表1。在样地内移除表层枯落物并剥离腐殖质层后，采用5点取样法，使用直径5 cm的土钻按0~10 cm、10~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm分层采集土壤样品，每层采集3个样品，同时用环刀采集各土层原状土测定土壤容重，用铝盒采集各土层鲜土用烘干法测定土壤含水量。SOC采用重铬酸钾稀释热法测定，STN采用半微量凯式定氮法测定，STP采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定[16]，土壤粒度组成使用激光粒度分析仪（Mastersize-zer 3000）测定。

1.3 数据处理

采用SPSS 26.0软件进行单因素方差分析（One-way ANOVA），并用最小显著性差异法进行多重比较，分析不同植物群落间土壤化学计量比的差异性，采用Origin 2021软件绘图；采用Pearson相关性分析对土壤养分及化学计量比之间的相关性进行分析；采用R 3.6.3软件对土壤含水量、容重、粉粒、砂粒和黏粒含量与土壤化学计量特征之间的相关性进行冗余分析（RDA）分析和多元回归分析，其中RDA采用Vegan包和ggplot 2包进行分析并绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤碳、氮、磷养分含量分布特征

不同植被0~100 cm土层的SOC、STN分别在0.232~0.367 g·kg^{-1}和0.034~0.056 g·kg^{-1}之间，均表现为刺槐>草地>沙棘>油松；在不同土层间的变异系数分别为0.45~0.80和0.26~0.47，属于中等变异；STP在0.557~0.631 g·kg^{-1}之间，表现为草地>刺槐>油松>沙棘，不同土层间的变异系数为0.04~0.05，属弱变异程度（表2）。

刺槐、沙棘和草地的SOC、STN在0~10 cm土层最高，油松的在20~40 cm土层最高；油松的SOC、STN在0~10 cm和10~20 cm土层显著低于刺槐、沙棘和草地（$P<0.05$），60~80 cm土层刺槐的SOC含量显著高于油松、沙棘和草地，80~100 cm土层刺槐的SOC显著高于沙棘和草地（$P<0.05$）；40~60 cm、60~80 cm、80~100 cm土层刺槐的STN显著高于油松、沙棘和草地（$P<0.05$）；油松、沙棘和草地的SOC、STN随土层加深呈下降趋势，刺槐在60~100 cm土层有增加趋势（图1）。

表1 样地基本信息

Tab. 1 Basic information about the sample sites

植物群落	海拔/m	林龄/a	平均高度/m	平均胸径(基径)/cm	郁闭度(盖度)/%	林下主要植被
油松（*Pinus tabulaeformis*）	1363	20	7.3	8.9	61	毛莲蒿（*Artemisia vestita*）
刺槐（*Robinia pseudoacacia*）	1429	20	10.3	15.0	75	针茅（*Stipa capillata*）、赖草（*Leymus secalinus*）、紫苜蓿（*Medicago sativa*）、兴安胡枝子（*Lespedeza daurica*）
沙棘（*Hippophae rhamnoides*）	1390	20	1.8	3.5	70	赖草、茵陈蒿（*Artemisia capillaris*）、毛莲蒿、兴安胡枝子
草地	1377	20	-	-	85	兴安胡枝子、赖草、针茅

注：-表示未进行测定。

表2　不同植被土壤碳氮磷养分含量

Tab. 2　Contents of soil carbon, nitrogen and phosphorus nutrients of different vegetations

土壤指标	植物群落	最大值 /g·kg⁻¹	最小值 /g·kg⁻¹	平均值 /g·kg⁻¹	标准差	变异系数
SOC	油松	0.562	0.098	0.232	0.105	0.45
	刺槐	0.947	0.219	0.367	0.183	0.50
	沙棘	0.992	0.087	0.302	0.243	0.80
	草地	0.764	0.172	0.341	0.179	0.52
STN	油松	0.055	0.020	0.034	0.009	0.26
	刺槐	0.086	0.044	0.056	0.012	0.21
	沙棘	0.086	0.021	0.043	0.020	0.47
	草地	0.078	0.030	0.044	0.014	0.32
STP	油松	0.646	0.554	0.591	0.031	0.05
	刺槐	0.656	0.565	0.619	0.027	0.04
	沙棘	0.596	0.493	0.557	0.025	0.04
	草地	0.689	0.588	0.631	0.026	0.04

注：SOC为土壤有机碳；STN为土壤全氮；STP为土壤全磷。下同。

2.2　土壤碳、氮、磷化学计量比分布特征

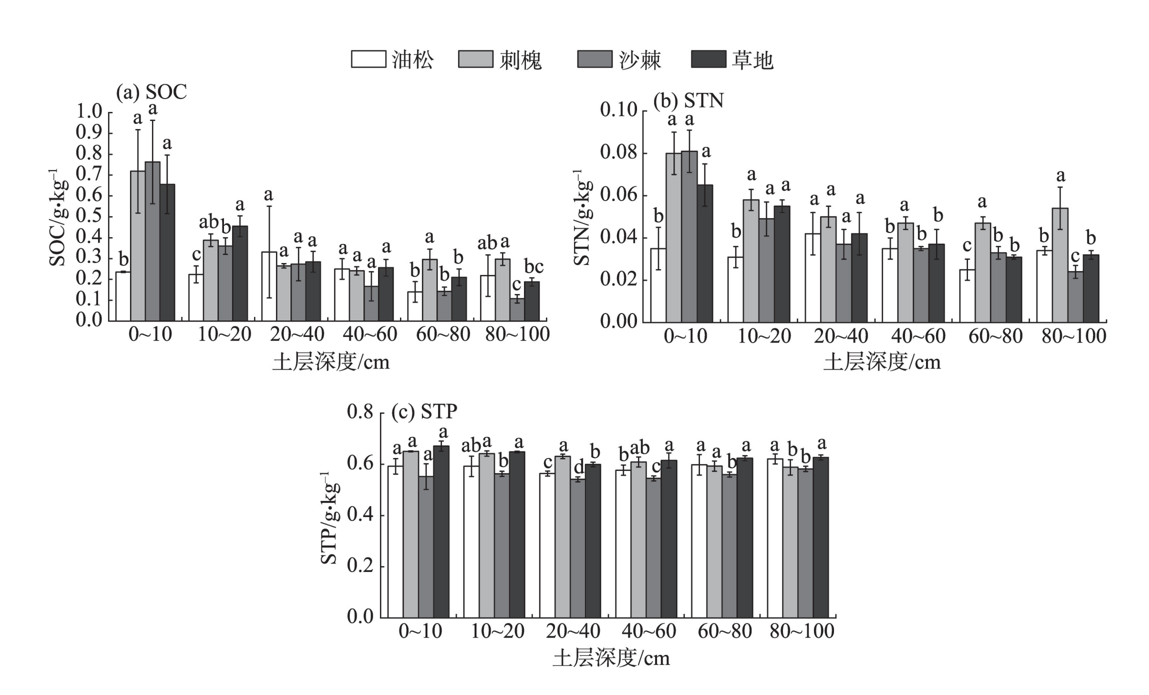
不同植被0~100 cm土壤C:N在6.284~7.516之间，表现为草地>油松>刺槐>沙棘，土壤C:P、N:P在0.395~0.588和0.058~0.090之间，均表现为刺槐>沙棘>草地>油松；不同土层间土壤C:N（0.23~0.36）、C:P（0.46~0.81）和N:P（0.20~0.47）的变异均属于中等变异程度（表3）。

除60~80 cm土层沙棘的C:N显著低于草地外（$P<0.05$），其他土层间各植物群落土壤C:N差异均不显著（$P>0.05$）；刺槐、沙棘和草地土壤C:P在0~10 cm土层最高，油松在20~40 cm土层最高，0~10 cm、10~20 cm土层油松土壤C:P显著低于刺槐、沙棘和草地，60~80 cm土层刺槐土壤C:P显著高于油松、沙棘和草地，80~100 cm土层刺槐土壤C:P显著高于沙棘和草地（$P<0.05$）；油松土壤N:P在20~40 cm土层最高，刺槐、沙棘和草地土壤N:P均在0~10 cm土层最高，10~20 cm土层油松土壤N:P显著低于刺槐、沙棘和草地，60~80 cm土层刺槐土壤N:P显著高于油松、沙棘和草地（$P<0.05$）（图2）。

2.3　土壤理化性质的相关性分析

SOC与STN呈极显著正相关，且均与土壤C:N、C:P、N:P呈极显著正相关（$P<0.01$），与STP呈显著正相关（$P<0.05$），SOC与C:N的相关性大于STN与C:N；STP仅与土壤C:N呈正相关（$P<0.05$）（表4）。

从RDA分析结果看，2个排序轴分别解释了83.0%和12.9%的变异。其中SOC、STN与土壤含水量（SWC）、土壤容重（BD）、土壤砂粒（sand）、土壤黏粒（caly）呈负相关，与土壤粉粒（silt）呈正相关，STP与clay、silt呈正相关，与sand、SWC和BD呈负相关；C:P、N:P与SWC、BD、clay呈负相关，C:N与clay、silt



注：SOC为土壤有机碳；STN为土壤全氮；STP为土壤全磷。不同小写字母表示同一土层深度不同植物群落间差异显著（$P<0.05$）。下同。

图1　不同植被土壤养分分布特征

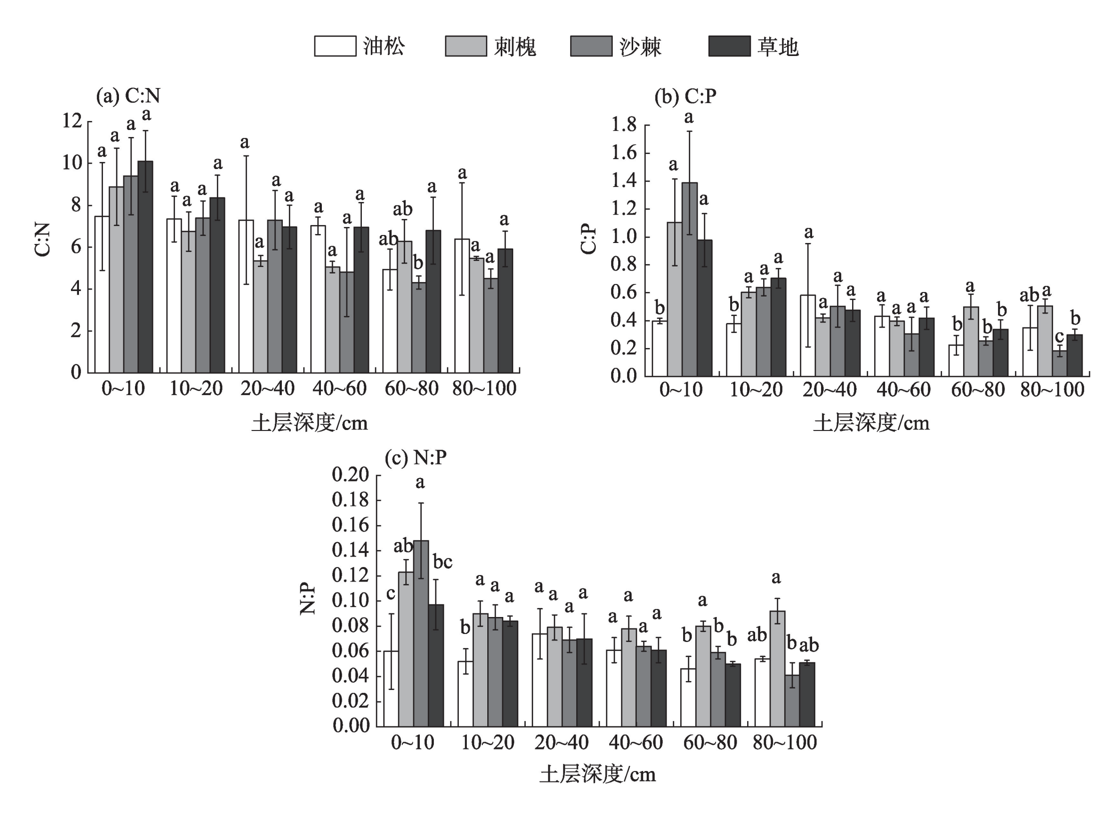
Fig. 1　Distribution characteristics of soil nutrients of different vegetations

表3 不同植被土壤化学计量比

Tab. 3 Soil stoichiometric ratio of different vegetations

土壤指标	植物群落	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数
C:N	油松	10.163	3.449	6.746	1.959	0.29
	刺槐	10.965	4.768	6.298	1.555	0.25
	沙棘	11.505	3.286	6.284	2.238	0.36
	草地	11.695	5.196	7.516	1.738	0.23
C:P	油松	0.969	0.170	0.395	0.181	0.46
	刺槐	1.456	0.367	0.588	0.272	0.46
	沙棘	1.737	0.146	0.545	0.443	0.81
	草地	1.144	0.276	0.535	0.257	0.48
N:P	油松	0.095	0.035	0.058	0.016	0.28
	刺槐	0.133	0.069	0.090	0.018	0.20
	沙棘	0.174	0.037	0.078	0.037	0.47
	草地	0.117	0.048	0.069	0.021	0.30

注:C:N为SOC与STN的比值;C:P为SOC与STP的比值;N:P为STN与STP的比值。下同。



注:C:N为SOC与STN的比值;C:P为SOC与STP的比值;N:P为STN与STP的比值。

图2 不同植被土壤化学计量分布特征

Fig. 2 Soil stoichiometric distribution characteristics of different vegetations

呈正相关,与sand、SWC和BD呈负相关(图3)。

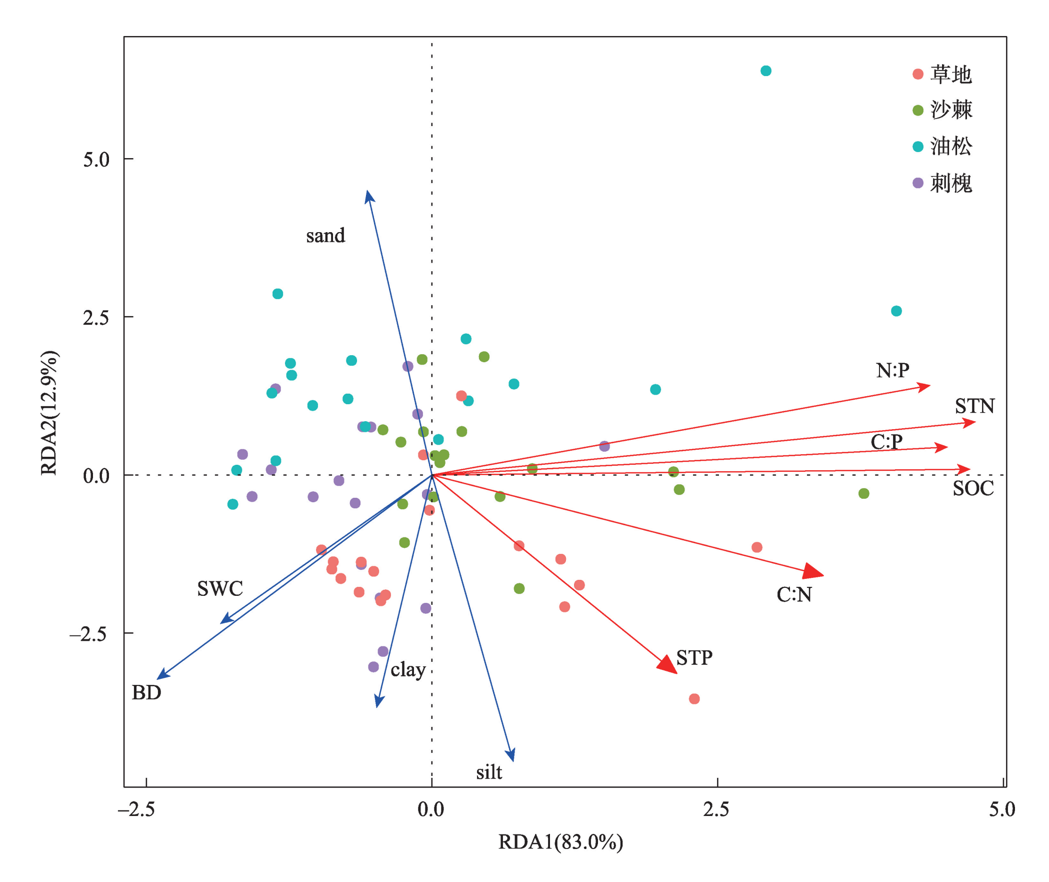
为进一步确定土壤各物理性质对土壤生态化学计量特征影响的相对重要性,对上述参与RDA分析的各因子进行逐步回归分析,结果表明:sand和BD是影响SOC的主要因子,silt、BD、SWC是影响STN的主要因子,silt、BD是影响STP的主要因子,clay、silt和SWC是影响C:P的主要因子,sand、BD、SWC是影响N:P的主要因子(表5)。

表4　土壤养分及化学计量相关性

Tab. 4　Correlation between soil nutrients and stoichiometry

土壤养分及化学计量	SOC	STN	STP	C:N	C:P	N:P
SOC	1.000					
STN	0.890**	1.000				
STP	0.290*	0.247*	1.000			
C:N	0.779**	0.458**	0.300*	1.000		
C:P	0.986**	0.885**	0.151	0.758**	1.000	
N:P	0.850**	0.973**	0.035	0.411**	0.882**	1.000

注：*表示差异显著（$P<0.05$）；**表示差异极显著（$P<0.01$）。



注：RDA1、RDA2分别为冗余分析第一排序轴、第二排序轴；SWC为土壤含水量；BD为土壤容重；clay为土壤黏粒；silt为土壤粉粒；sand为土壤砂粒。

图3　土壤理化性质之间的相关关系

Fig. 3　Correlation between soil physical and chemical properties

表5　土壤理化性质多元线性回归分析

Tab. 5　Multiple linear regression analysis of soil physical and chemical properties

土壤理化性质	多元回归方程	r	P
SOC	Y=−0.02sand−7.61BD+14.4	0.41	0.00400
STN	Y =0.002silt−0.76BD−0.001SWC+1.26	0.72	0.00001
STP	Y =0.009silt−0.78BD+1.42	0.66	0.00001
C:P	Y=−7601.8clay+1046.4silt−85.16SWC−23967.74	0.55	0.00100
N:P	Y=−0.002sand−1.04BD−0.001SWC+1.99	0.62	0.00020

注：clay为土壤黏粒；silt为土壤粉粒；sand为土壤砂粒；BD为土壤容重；SWC为土壤含水量；r为相关系数；$P<0.01$表示方程达极显著水平。

3 讨论

3.1 不同植被对土壤养分的影响

本研究结果表明，不同植被土壤养分具有“表聚性”，SOC与STN随土层加深逐渐降低，STP随土层变异较弱，与前人研究结果一致[5,17]。SOC的来源主要是地上凋落物和地下根系分泌物[18]，STN的来源包括植物的固N作用和动植物残体分解合成的有机质[19]，受外界环境扰动和凋落物养分归还的影响，土壤C、N首先在表层聚集，再通过降水向下层淋溶。STP主要受成土母质及气候和生物等条件的影响，因此随土层的变异较小。有研究表明，土壤水分含量影响有机碳的矿化速率及STN在土壤中的积累[20]，油松SOC、STN含量在0~10 cm土层含量低于20~40 cm，一方面是因为油松是针叶树种，凋落物分解对表层养分的输入较少[18]，另一方面是因为油松表层SWC过高而加速了SOC的矿化以及表层STN向下层的淋溶。

不同植被土壤C、N含量差异显著，与前人研究结果一致[21]。其中，刺槐SOC、STN最高，且在60~100 cm土层呈升高趋势，这与任璐璐等[5]的研究结果一致。刺槐是阔叶固N树种，经过20 a的植被恢复，形成了以兴安胡枝子、针茅、赖草等为主要林下植被的群落结构，物种多样性增加，枯落物层较厚，导致C、N含量增加[21-22]；同时较大的根系生物量使刺槐在较深土层中的固C能力更强[13]。沙棘和草地的表层土壤SOC、STN含量高于油松，但油松SOC、STN含量在80~100 cm土层高于沙棘和草地，与前人[23-24]研究结果一致。沙棘和草地在植被恢复中形成了以兴安胡枝子、赖草、毛莲蒿为优势种的植物群落，受凋落物及植物根系影响，表层养分输入高，而油松是针叶乔木树种，林下主要优势种为毛莲蒿，物种多样性低，凋落物分解慢，表层养分输入少，但其根系分布较沙棘和草本更深，而深层SOC主要来源于根系分泌物和腐解的死根[12]，因此在更深层土壤中，油松的SOC、STN含量高于沙棘和草地。

3.2 不同植被对土壤碳、氮、磷化学计量比的影响

土壤C:N可反映土壤N元素矿化能力，较低的C:N值，预示着较高的N矿化能力[25]。本研究结果中土壤C:N低于全球(13.33)和全国平均值(10.459)[26]，与王慧等[27]的研究结果一致，说明研究区的有机质分解矿化能力强。有研究表明，土壤C、N含量具有空间异质性，但在植被生长过程中C、N的累积和消耗保持相对稳定，不同植被土壤C:N值差异不大[26,28]，与本研究结果一致。土壤C:P是反映土壤微生物在矿化作用下释放P元素或者从土壤环境中吸收固定P元素潜力的重要指标[29]，本研究中土壤C:P远低于全国平均水平(52.70)[26]，表明研究区有机质分解释放P的潜力大，P的有效性较高。N:P是反映植物生长受N、P营养元素限制情况的重要指标，当土壤的C:N<30、N:P<14时，N元素是影响土壤肥力的主要因素[30]。本研究结果N:P远低于全球(13)和全国(9.3)平均值[26]，其中刺槐N:P显著高于其他植物群落，与前人研究结果一致[5,27]，说明研究区的植物生长主要受N元素限制，刺槐的土壤肥力情况较好。该研究区4种植被类型土壤化学计量均低于前人在黄土高原的研究结果[7,11]，一方面是因为研究选取土壤剖面深度与前人不同，土壤的C、N、P及其计量比随剖面变化具有一定的变异性；另一方面由于黄土高原特殊的土壤母质及气候条件，研究区植被恢复过程中，受多种环境因子的影响，植物对土壤中的养分进行了选择性吸收[7,31]。

3.3 土壤物理性质及化学计量特征间的相关性

本研究结果中SOC和STN均与土壤C:N、C:P、N:P呈极显著正相关，且SOC与土壤C:N的相关性大于STN，说明SOC显著影响土壤N矿化潜力和有机质分解释放P的潜力。STP仅与土壤C:N呈正相关，表明不同植物群落土壤C:P、N:P主要受SOC和STN影响[32]。

SOC和STN与SWC呈负相关，这一结果与苏卓侠等[33]对0~20 cm土层的研究结果不同，但与毛娜等[20]在0~200 cm土层中的研究结果一致。汤洁等[34]研究表明，土壤含水率过高或过低均会导致SOC含量降低，同时SWC还受土壤质地和植被类型等的影响[20]。本研究中油松表层SWC较高而SOC、STN含量较低也说明了这一点，因此，不同植被类型SWC与SOC、STN的关系还需进一步探讨，不能只用单一的线性相关来描述。本研究结果中SOC、STN及STP与BD呈负相关，与silt呈正相关，这与前人的研究结果一致[35-36]。植被恢复过程中，凋落物分解和植物根系会促进微生物活动进而改善土壤结构[37]，同时土壤silt、clay对土壤有机质的吸附作用，也增大了土壤有机质的稳定性[38]。本研究中逐步回归分析结果中未有变量进入土壤C:N方程，这与SOC和STN极显著正相关的结果一致，由于其具有高度一

致性，因此受环境影响较小。本研究中C:P、N:P与clay呈负相关，可能是因为P元素对土壤黏粒的响应强于C和N元素而造成的。

4　结 论

本文以黄土丘陵区油松、刺槐、沙棘和草地4种典型退耕恢复植被0~100 cm土壤为研究对象，探讨了不同植被SOC、STN、STP及其化学计量特征，得出以下结论：

（1）研究区不同植被土壤养分差异显著，刺槐的养分含量最高，可作为当地植被恢复的参考。

（2）研究区土壤养分具有“表聚性”，SOC和STN随土层加深逐渐降低，STP随土层变异较弱。其中，刺槐的SOC和STN在60~100 cm土层有增加趋势。

（3）研究区土壤C:N、C:P在各退耕恢复植被间差异不显著，刺槐N:P显著高于其他植被类型。土壤C:N、C:P、N:P值均低于全球水平和全国水平，说明研究区有机质分解速率快，P的有效性高，植被生长主要受N元素限制。

（4）研究区土壤C:N、C:P、N:P主要受SOC和STN影响；BD及silt是影响土壤养分的主要物理性质。

参考文献（References）

[1] Piaszczyk W, Błońska E, Lasota J, et al. A comparison of C:N:P stoichiometry in soil and deadwood at an advanced decomposition stage[J]. Catena, 2019, 179: 1–5.

[2] 李鑫, 张文菊, 邬磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. 中国农业科学, 2021, 54(14): 3043–3056. [Li Xin, Zhang Wenju, Wu Lei. et al. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation[J]. Scientia Agricultural Sinica, 2021, 54(14): 3043–3056.]

[3] Cook K. Soil microbiology, ecology, and biochemistry, fourth edition[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(6): 1821.

[4] 海旭莹, 董凌勃, 汪晓珍, 等. 黄土高原退耕还草地C、N、P生态化学计量特征对植物多样性的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8570–8581. [Hai Xuying, Dong Lingbo, Wang Xiaozhen. et al. Effects of carbon, nitrogen, and phosohrus ecological stoichiometry characteristics on plant diversity since returning farmland to grassland on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8570–8581.]

[5] 任璐璐, 张炳学, 韩凤朋, 等. 黄土高原不同年限刺槐土壤化学计量特征分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 339–344. [Ren Lulu, Zhang Bingxue, Han Fengpeng. et al. Ecological stoichiometric characteristics of soils in *Robinia pseudoacacia* forests of different ages on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 339–344.]

[6] Liu Y, Fang Y, An S S. How C:N:P stoichiometry in soils and plants responds to succession in *Robinia pseudoacacia* forests on the Loess Plateau, China[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 475: 118394, doi: 10.1016/j.foreco.2020.118394.

[7] 杨佳佳, 张向茹, 马露莎, 等. 黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 133–142. [Yang Jiajia, Zhang Xiangru, Ma Lusha, et al. Ecological stoichiometric relationships between components of *Robinia pseudoacacia* of forest in Loess Plateau[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1): 133–142.]

[8] 曾全超, 李鑫, 董扬红, 等. 陕北黄土高原土壤性质及其生态化学计量的纬度变化特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 870–879. [Zeng Quanchao, Li Xin, Dong Yanghong, et al. Ecological stoichiometry characteristics and physical-chemical properties of soil at different latitudes on the Loess Plateau[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5): 870–879.]

[9] 王岩松, 马保明, 高海平, 等. 晋西黄土区油松和刺槐人工林土壤养分及其化学计量比对林分密度的响应[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(8): 81–93. [Wang Yansong, Ma Baoming, Gao Haiping, et al. Response of soil nutrients and their stoichiometric ratios to stand density in *Pinus tabuliformis* and *Robinia pseudoacacia* plantations in the loess region of western Shanxi Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(8): 81–93.]

[10] Mobley M L, Lajtha K, Kramer M G , et al. Surficial gains and subsoil losses of soil carbon and nitrogen during secondary forest development[J]. Global Change Biology, 2015, 21(2): 986–996.

[11] 尹秋龙, 寇萌, 焦菊英, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植物群落的土壤养分及其化学计量特征[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 62–66. [Yin Qiulong, Kou Meng, Jiao Juying, et al. Characteristics of soil nutrients and stoichiometry in different communities in hilly-gullied region of Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 62–66.]

[12] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Applications, 2000, 10(2): 423–436.

[13] Lorenz K, Lal R. The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons[J]. Advances in Agronomy, 2005, 88: 35–66.

[14] Fontaine S, Barot S, Barré P, et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. Nature, 2007, 450(7167): 277–280.

[15] 姜丽, 魏天兴, 李亦然, 等. 地形因子对陕北黄土丘陵区防护林树种分布的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1763–1771. [Jiang Li, Wei Tianxing, Li Yiran. et al. Effects of topographical factors on tree species distribution of shelter forest in loess hilly region of northern Shaanxi[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(6): 1763–1771.]

[16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2008. [Bao Shidan. Study of analysis of soil and agrochemistry[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2008.]

[17] 孙骞, 王兵, 周怀平, 等. 黄土丘陵区小流域土壤碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性[J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 766-774. [Sun Qian, Wang Bing, Zhou Huaiping. et al. Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small catchment of loess hilly area[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(3): 766-774.]

[18] 李强, 周道玮, 陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J]. 生态学报, 2014, 34(14): 3807-3819. [Li Qiang, Zhou Daowei, Chen Xiaoying. The accumulation, decomposition and ecological effects of above-ground litter in terrestrial ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(14): 3807-3819.]

[19] Deng L, Shangguan Z P. Afforestation drives soil carbon and nitrogen changes in China[J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(1): 151-165.

[20] 毛娜, 邵明安, 黄来明. 六道沟小流域地形序列土壤碳剖面分布特征及影响因素[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 222-230. [Mao Na, Shao Ming'an, Huang Laiming. Distribution characteristics and influencing factors of soil carbon profile along toposequences in Liudaogou Watershed[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(5): 222-230.]

[21] 刘若莎, 王冬梅. 黄土高原高寒区不同人工林土壤养分及生态化学计量特征[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(1): 88-95. [Liu Ruosha, Wang Dongmei. Soil nutrients and ecostoichiometric characteristics of different plantations in the alpine region of the Loess Plateau[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(1): 88-95.]

[22] Shi J, Cui L L. Soil carbon change and its affecting factors following afforestation in China[J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 98(2): 75-85.

[23] 刘伟, 程积民, 高阳, 等. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 68-76. [Liu Wei, Cheng Jimin, Gao Yang, et al. Distribution of soil organic carbon in grassland on Loess Plateau and its infuencing factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(1): 68-76.]

[24] 张智勇, 王瑜, 艾宁, 等. 陕北黄土区不同植被类型土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(11): 56-63. [Zhang Zhiyong, Wang Yu, Ai Ning, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and its influencing factors in different vegetation types in loess region of nourthern Shaanxi Province, northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(11): 56-63.]

[25] 赵华晨, 高菲, 李斯雯, 等. 长白山阔叶红松林和杨桦次生林土壤有机碳氮的协同积累特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1615-1624. [Zhao Huachen, Gao Fei, Li Siwen, et al. Co-accumulation characters of soil organic carbon and nitrogen under broadleaved *Korean pine* and *Betula platyphylla* secondary forests in Changbai Mountain, China[J]. Journal of Applied Ecology, 2019, 30(5): 1615-1624.]

[26] Tian H, Chen G, Zhang C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1-3): 139-151.

[27] 王慧, 郭月峰, 姚云峰, 等. 不同土地利用方式下土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 西南农业学报, 2020, 33(5): 995-1000. [Wang Hui, Guo Yuefeng, Yao Yunfeng, et al. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus under different land use patterns[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(5): 995-1000.]

[28] Yang Y H, Fang J Y, Guo D L, et al. Vertical patterns of soil carbon, nitrogen and carbon: Nitrogen stoichiometry in Tibetan grasslands[J]. Biogeosciences Discussions, 2010, 7: 1-24.

[29] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947. [Wang Shaoqiang, Yu Guirui. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937-3947.]

[30] Vitousek P M, Farrington H. Nutrient limitation and soil development: Experimental test of a biogeochemical theory[J]. Biogeochemistry, 1997, 37(1): 63-75.

[31] 温晨, 杨智姣, 杨磊, 等. 半干旱黄土小流域不同植被类型植物与土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1824-1834. [Wen Chen, Yang Zhijiao, Yang Lei, et al. Ecological stoichiometry characteristics of plants and soil under different vegetation types in the semi-arid loess small watershed[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1824-1834.]

[32] Wang L L, Zhang G H, Zhu P Z, et al. Soil C, N and P contents and their stoichiometry as affected by typical plant communities on steep gully slopes of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2022, 208: 105740, doi: 10.1016/j.catena.2021.105740.

[33] 苏卓侠, 苏冰倩, 上官周平. 黄土高原刺槐叶片-土壤生态化学计量参数对降雨量的响应特征[J]. 生态学报, 2020, 40(19): 7000-7008. [Su Zhuoxia, Su Bingqian, Shangguan Zhouping, et al. Response characteristics of *Robinia pseudoacacia* leaf and soil ecological stoichiometric parameters to precipitation in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 7000-7008.]

[34] 汤洁, 娄云, 李娜, 等. 冻融作用下盐碱水田土壤含水率和氮素对有机碳影响研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(4): 620-623. [Tang Jie, Lou Yun, Li Na, et al. Soil moisture content and nitrogen impacts on soil organic carbon of saline-alkali paddy field under the effect of freeze-thaw[J]. Ecology and Environment Sciences, 2012, 21(4): 620-623.]

[35] 王亚东, 魏江生, 周梅, 等. 大兴安岭南段杨桦次生林土壤化学计量特征[J]. 土壤通报, 2020, 51(5): 1056-1064. [Wang Yadong, Wei Jiangsheng, Zhou Mei, et al. Soil stoichiometric characteristics in the poplar and birch secondary forests in southern Greater Xing'an Mountains[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(5): 1056-1064.]

[36] 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 等. 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 416-424. [Shang Suyun, Jiang Peikun, Song Zhaoliang, et al. Composition and stability of organic carbon in the top soil under different forest types

in subtropical China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 416−424.]

[37] 张岩松, 雷泽勇, 于东伟, 等. 沙质草地营造樟子松林后土壤容重的变化及其影响因子[J]. 生态学报, 2019, 39(19): 7144−7152. [Zhang Yansong, Lei Zeyong, Yu Dongwei, et al. Changes in soil bulk density and its influencing factors after sandy grassland afforestation with *Pinus sylvestris* var. *mongolica*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): 7144−7152.]

[38] 葛楠楠, 石芸, 杨宪龙, 等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1626−1632. [Ge Nannan, Shi Yun, Yang Xianlong, et al. Distribution of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and water stable aggregates of cropland with different soil textures on the Loess Plateau, northwest China[J]. Journal of Applied Ecology, 2017, 28(5): 1626−1632.]

Characteristics of soil ecological stoichiometry in typical fallow-restored vegetation in the loess hilly areas

GUO Xin,　WEI Tianxing,　CHEN Yuxuan,　SHA Guoliang,　REN Kang,　YU Huan

(College of Soil and Water Conservation/Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation and Desertification Combating/Ji County Station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Beijing Forestry University, Beijing　100083, China)

Abstract: The hilly and gully areas of China's Loess Plateau are an arid and semi-arid region characterized by fragile ecosystems and harsh climates. A series of implemented ecological restoration projects, such as the "Grain for Green Project", have greatly improved the local environments. To understand local nutrient cycling following vegetation restoration, it is important to study the content and ecological stoichiometry of soil carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) in different vegetation types and determine their driving factors. In our study, soil samples were collected in 0−100 cm layers from *Pinus tabulaeformis*, *Robinia pseudoacacia*, *Hippophae rhamnoides*, and grassland. The content and ecological stoichiometry of soil organic carbon (SOC), total nitrogen (STN), and total phosphorus (STP) were analyzed. The effects of soil water content (SWC), soil bulk density (BD), and soil texture on the stoichiometric characteristics were also analyzed. The results showed that: (1) Vegetation types had significant effects on the variations in soil nutrient contents. More specifically, *Robinia pseudoacacia* had the highest SOC and STN contents, whereas *Pinus tabulaeformis* had the lowest SOC and STN contents. STP content levels can be arranged in the following order: grassland>*Robinia pseudoacacia*>*Pinus tabulaeformis*>*Hippophae rhamnoides*. (2) Substantial soil nutrients accumulated on the soil surface among different vegetation types. With increasing soil depth, SOC and STN showed similar downward trends, whereas the variability of STP was comparatively weak. In particular, SOC and STN in *Robinia pseudoacacia* showed increases from 60−100 cm. (3) The variations in soil C:N and C:P among different vegetation types were not significant. *Robinia pseudoacacia* had significantly higher N:P than *Pinus tabulaeformis*, *Hippophae rhamnoides*, and grassland. In our study area, C:N, C:P and N:P were lower than global and national average levels, which indicated that the decomposition rate of organic matter in the soil was slow; the effectiveness of phosphorus was high, and vegetation growth was primarily limited by soil nitrogen. (4) C:N was mainly affected by SOC, whereas C:P and N:P were mainly affected by SOC and STN. Overall, soil nutrients were negatively correlated with SWC and BD but positively correlated with soil silt and clay content. The response of STP to soil fine particles was greater than that of SOC and STN. In our study, significant differences in soil stoichiometry characteristics were detected in the 0−100 cm soil layers among different fallow-restored vegetation types. Most notably, *Robinia pseudoacacia* had higher soil nutrients than other vegetation types. The results of the study can provide guidance for further revegetation restoration work in loess hilly areas.

Key words: the loess hilly areas; fallow restored vegetations; soil nutrients; ecological stoichiometry; soil physical properties